

2.4.6. フレキシブルライザーパイプ(FRP)の部材検討

FRP は、図 2-34 船上直接圧入システムの検討フローのように、いったん構造設計後、FRP の静的および動的挙動解析を経て、その結果を船体、DPS、ピックアップ嵌合装置の検討結果をフィードバックして、再度構造設計に戻って、同様のループを繰り返しながら検討している。これらの解析を進め、最大張力、最大曲率が許容範囲内となる FRP の構造を設計している。(資料編 2-29)

2.4.6.1. インターロック管

2.4.6.1.1. インターロック管の組み立て

インターロック管は、ステンレス製の板材を螺旋状に成形して製作され、外水圧と布設時の側圧に対する補強が主な機能となる。インターロック管の性能評価を行うため 4inch にサイズダウンし試作を行った。試作したインターロック管を下図に示す。成形性に問題はなく試作結果は良好であった。



図 2-49 インターロック管

2.4.6.1.2. 曲げ特性のデータ解析

最終的な FRP の最小曲げ半径を制限しない様、インターロック管は十分小さな曲げ半径まで曲げられる特性が必要となる。インターロック管の曲げ試験状況を下図に示す。インターロック管の曲げ特性として十分な特性を持っていることが確認できた。



図 2-50 インターロック管の曲げ試験

2.4.6.1.3. 側圧強度のデータ解析

インターロック管の側圧強度を評価するため、2対の圧縮板の間にインターロック管を設置し、側圧試験を実施した。試験方法を下図に示す。

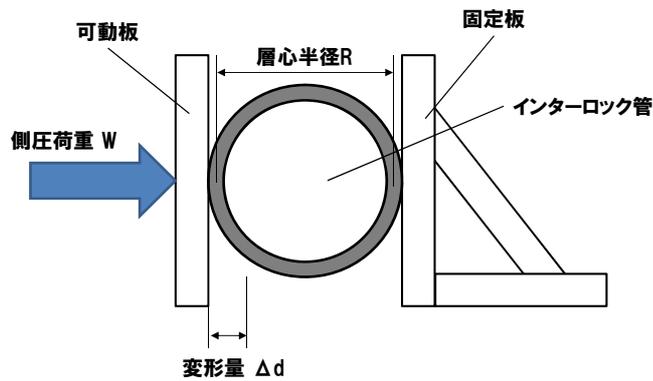


図 2-51 インターロック管の側圧試験方法

試験結果を下表に示す。インターロック管の側圧試験で得られた側圧荷重と変形量の関係から、単位長さ辺りの断面二次モーメントを算出した。インターロック管に必要な側圧強度は布設工法によって異なるため、今後は布設工法と合わせて側圧強度が満足するかどうかを検討する必要がある。

表 2-17 インターロック管の側圧試験結果

側圧試験結果 $W/\Delta d$	N/mm ²	55.12
断面二次モーメント I	mm ⁴ /mm	6.72

$$\frac{W}{\Delta d} = \frac{1}{k_d} \cdot \frac{EI}{R^3}$$

$$I = k_d \cdot \frac{W}{\Delta d} \cdot \frac{R^3}{E}$$

側圧試験結果 $W/\Delta d$ (N/mm²)
断面二次モーメント I (mm⁴/mm)
対象二点圧縮変形係数 $k_d = \pi/4 \cdot 2/\pi$
SUS304 弾性率 $E = 197$ (GPa)
層心半径 $R = 50.8$ (mm)

2.4.6.2. 内圧補強層

2.4.6.2.1. 繊維補強テープ、C型条の組み立て

FRPの内圧補強部材として、軽量化の目標を達成できないことからC型条は検討対象から除外し、繊維補強テープについてのみ試作検討を実施した。繊維補強テープに使用する繊維については、各種高強度繊維の中から最も汎用性のあるアラミド繊維を選択した。テープ構造についてはFRP使用時の繰り返し曲げによる耐摩耗を考慮してアラミド繊維に樹脂被覆した構造を採用した。繊維補強テープ諸元及び機械物性を表 2-18 に示す。

表 2-18 繊維補強テープ諸元

項目		諸元
繊維種類		アラミド繊維
公称テープ幅	mm	60 (測定値：53.6～56.0)
公称テープ厚さ	mm	0.6 (測定値：0.63～0.67)
テープ重量 (単位長あたり)	g/m	測定値：17.6～17.7
引張強度	MPa	約 900
引張弾性率	GPa	約 47

2.4.6.2.2. 2inch モデルパイプの組み立て

繊維補強テープの成形性を確認するため、HDPE (高密度ポリエチレン) 製モデルパイプに繊維補強テープ単層を巻き付ける評価を行った。巻き付け条件については表 2-19 に示す条件にて評価した。

表 2-19 巻き付け条件

項 目		諸元
モデルパイプ内径	mm	75
モデルパイプ外径	mm	90
モデルパイプ長さ	mm	約 1,200
巻き付け角度	deg	約 77
巻き付けギャップ（隙間）	mm	約 5
テープ巻き付け半径	mm	約 48

実機 FRP の約 1/2 モデルでの評価であることから繊維補強テープの巻き付け半径（曲げ半径）は実機に対して小さくなる条件（厳しい条件）であったが、図 2-52 に示すとおり巻き付け成形性に関しては良好であることを確認した。なお巻き付けギャップ部は図 2-52 の黒い部分（モデルパイプ表面）である。

実機 FRP では繊維補強テープを複数層巻きすることになるが、今回評価した巻き付け半径条件よりやさしくなることから成形性は問題ないものと言える。

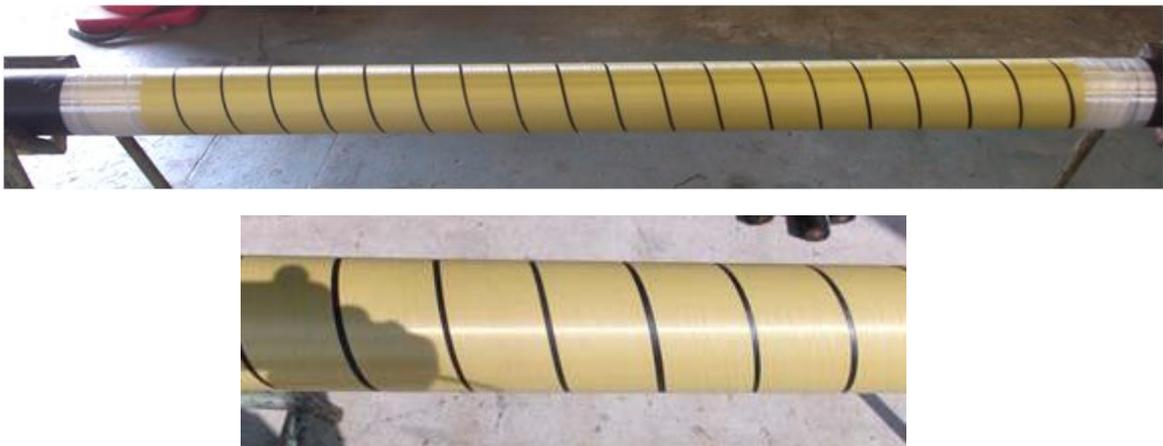


図 2-52 繊維補強テープ巻き付け後外観

2.4.6.2.3. 2inch モデルパイプの内圧破壊試験

繊維補強テープの内圧破壊特性を確認するため、巻き付け成形評価試料にて内圧破壊試験を実施した。

(1) 試験方法

モデルパイプ両端に試験端末を取り付けた試料を防護容器内に挿入し、試料内に水を充填

し、試料片端に圧力センサを取り付けて他端から水圧ポンプにて破壊するまで昇圧した。試験条件を表 2-20 に、試験前の試料の状況を図 2-53 に示す。

表 2-20 試験条件

昇圧速度	1MPa/min
長手方向条件	伸びフリー
試料内水温	測定値：9.3℃
外気温	測定値：13.0℃
試料表面温度	測定値：10.4℃



図 2-53 試料外観及び防護容器内設置状況

(2) 試験結果

内圧破壊値は図 2-54 の圧力チャートで示すとおり 7.9MPa となった。破壊に至る状況は、図 2-55 に示すように内圧上昇にともない螺旋要素である繊維補強テープのトルクに起因する捻れと曲げが発生し、最終的に図 2-56 に示すように試験端末際のギャップ部で破壊するモードとなった。

内圧による **Hoop Stress** のみ（捻れと曲げの影響が出ない状態）で繊維補強テープが引張強度（約 900MPa）に達する内圧は 10MPa 前後となることから、今回の内圧破壊結果は概ね妥当な値であると言える。このような破壊モードとなったのは内圧補強層が単層でトルクバランスが取れないことによるものだが、実機 FRP では内圧補強層が多層巻きでギャップ部が補強され、更に交互巻きの軸力補強層によりトルクバランスが取れる（捻れがほとんど発生しない）ことから設計どおりの内圧特性を示すものと思われる。今後、実機 FRP 構造に近い試料にて破壊モード及び破壊特性の確認を行っておく必要がある。

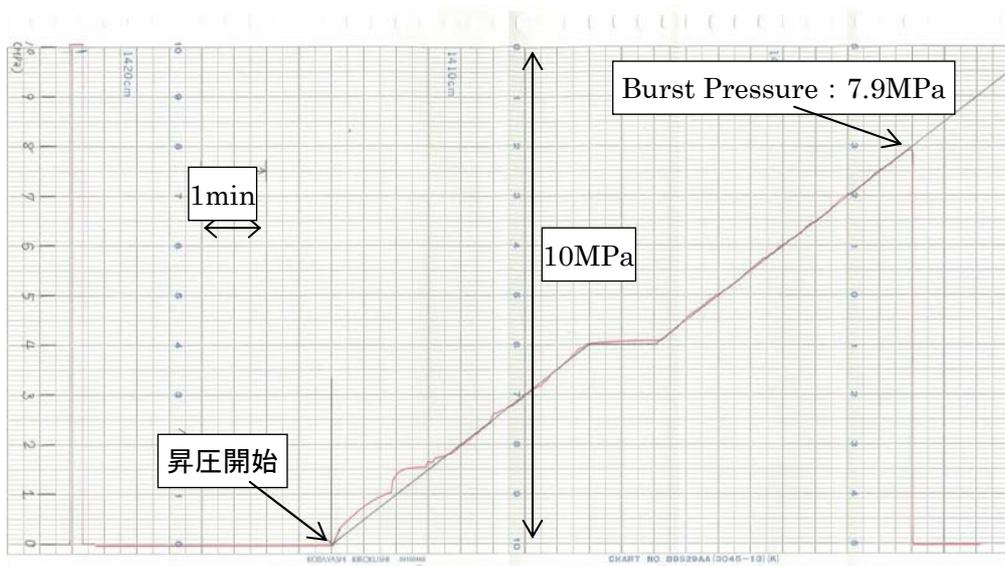


図 2-54 圧力チャート

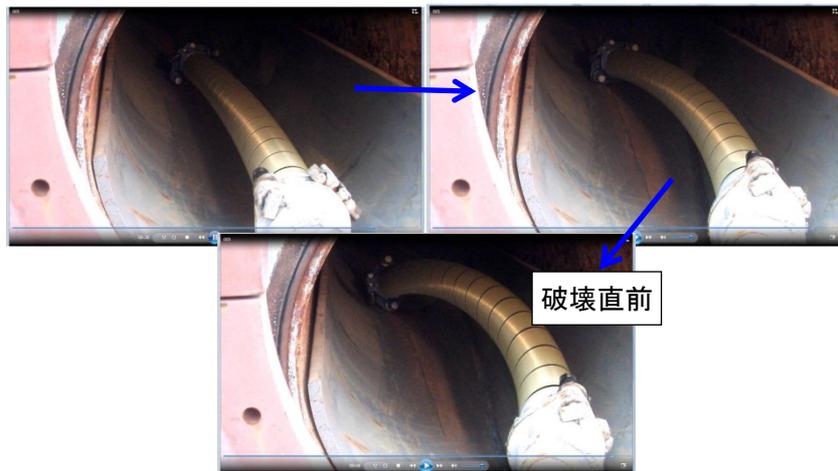


図 2-55 昇圧中の試料状況（捻れ+曲げ）



図 2-56 内圧破壊部

2.4.6.3. 軸力補強層

2.4.6.3.1. 平型条、高強度鋼線、繊維補強条の組み立て

(1) 平型条、高強度鋼線

一般的な FRP の金属製軸力補強層としては平型条や丸型鉄線が使用されている。軸力補強条の強度を向上できれば FRP に使用する金属部材を減らすことが可能で、FRP の軽量化に繋がる。今回は軸力補強条の高強度化を目指し、丸型の補強条を選択して試作を行った。平型条については実現性が劣るため試作対象から除外した。また、高強度鋼線と同サイズ(外径 7mm)となる PET 線の試作も行った。PET 線は軸力補強ではなく隙間を埋めるスペーサーの役割を持つ。それぞれの試作品の外観を図 2-57、図 2-58 に示す。外観上問題はなく、試作結果は良好であった。



図 2-57 高強度鋼線試作品



図 2-58 PET 線試作品

(2) 繊維補強条

FRP の軸力補強層として繊維補強条の検討と試作を行った。繊維補強条に使用する繊維については巻き付け成形性に対して比較的柔軟性を有する LCP 繊維を選択した。また補強条構造については FRP 使用時の繰返し曲げによる耐摩耗を考慮して樹脂被覆構造を採用

した。緒元を表 2-21、試作品を図 2-59 に示す。

表 2-21 繊維補強条諸元

項目		諸元
繊維種類		LCP 繊維
樹脂被覆外径	mm	7.0 (測定値 : 7.02)
繊維外径	mm	5.5 (測定値 : 5.39)
重量 (単位長あたり)	g/m	測定値 : 44.2



図 2-59 繊維補強条試作品

2.4.6.3.2. 引張強度のデータ解析

(1) 平型条、高強度鋼線

試作した高強度鋼線の引張試験結果を表 2-22 に示す。FRP の構造設計に用いた設計パラメータよりも高めの値を示しており、強度的に問題がないことを確認できた。

表 2-22 高強度鋼線軸力補強条物性値

材質	SWRS82B
外径 (mm)	7.0
破断強度 (MPa)	1535
降伏強度 (MPa)	1292
伸び (%)	6.6

(2) 繊維補強条

試作した繊維補強条の機械物性評価結果を表 2-23 に示す。引張強度は高強度鋼線の半分程度であるが、比強度では高強度鋼線の 3 倍以上となる。

表 2-23 繊維補強条物性値

項 目		諸 元
最小曲げ半径	mm	約 70
引張強力	kN	30
引張強度	MPa	775
引張弾性率	GPa	約 32
比強度 (単位比重あたり強度)	MPa	670

2.4.6.3.3. 巻き付け性評価用治具の組み立て

軸力補強層は、FRP にロングピッチで螺旋巻きすることで、パイプとしてのフレキシブル性を失うことなく、軸方向の補強が可能となる。FRP 製造工程での軸力補強層の巻き付け状況を図 2-60 に示す。強度が高くスプリングバック量が大きい軸力補強層の場合、プレフォーム加工と呼ばれる予備加工が必要となり、巻き付け前に螺旋状に加工しておくことで、巻き付け性が大きく向上する。今回試作した高強度鋼線についても同様に、プレフォーム加工性、巻き付け性に関する評価を行った。



図 2-60 軸力補強層の巻き付け状況

プレフォーム加工性の評価を行うため、まず評価治具の検討を行った。評価治具は曲げ機構と振り機構を別々に備え、評価治具内に鋼線を通すことで螺旋状に加工することができる。 $\phi 7\text{mm}$ の高強度鋼線に対応する前に、 $\phi 3\text{mm}$ の軟鉄線に対応した小スケールの検証実験を実施した。検証実験に用いた評価治具の図面を図 2-61 に示す。検証実験の状況は図 2-62 に示す。本検証実験により評価治具の機構に問題ないことが確認された。

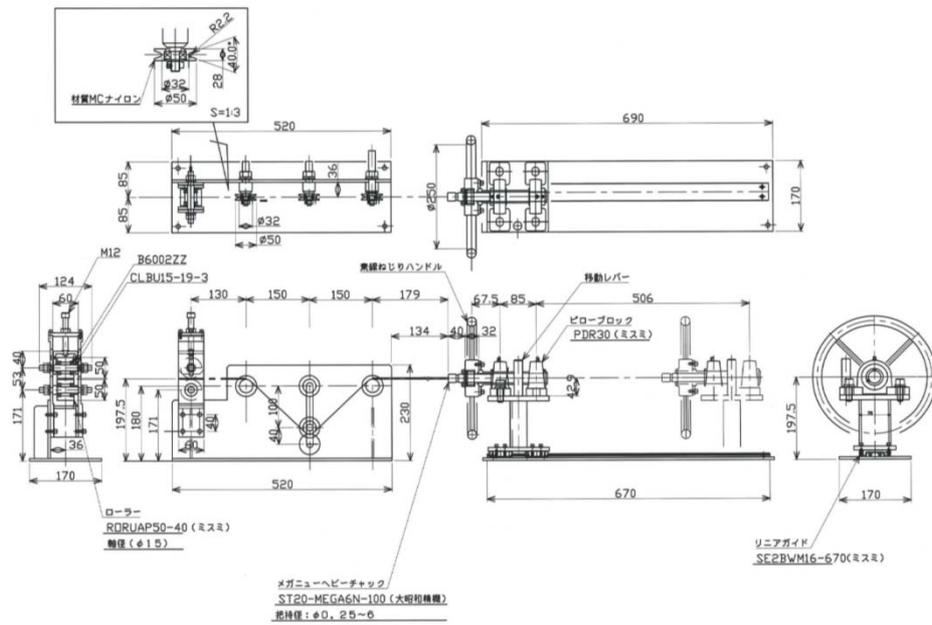


図 2-61 検証実験用プレフォーム加工性評価治具

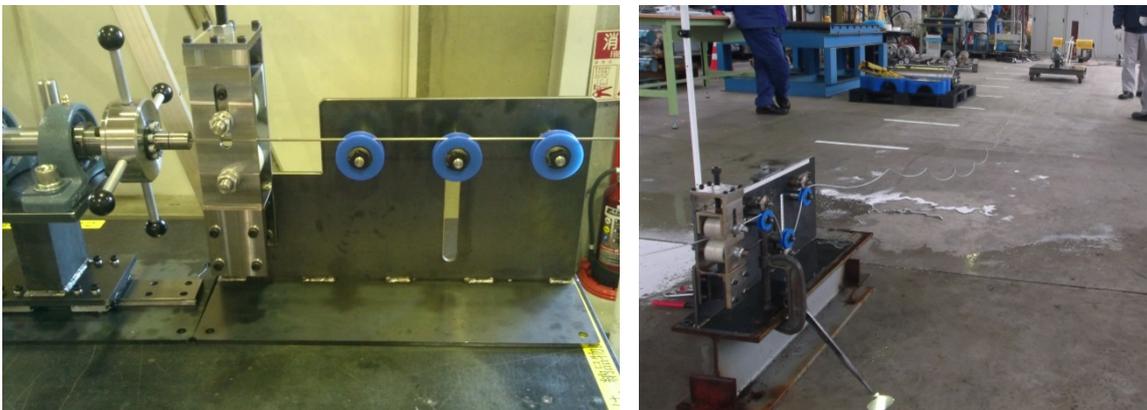


図 2-62 プレフォーム加工性評価治具の検証実験状況

φ7mm の高強度鋼線に対応した評価治具の図面を図 2-63 に示す。螺旋状に加工するために必要な強度を持たせるため各構成部材の大型化を検討した。

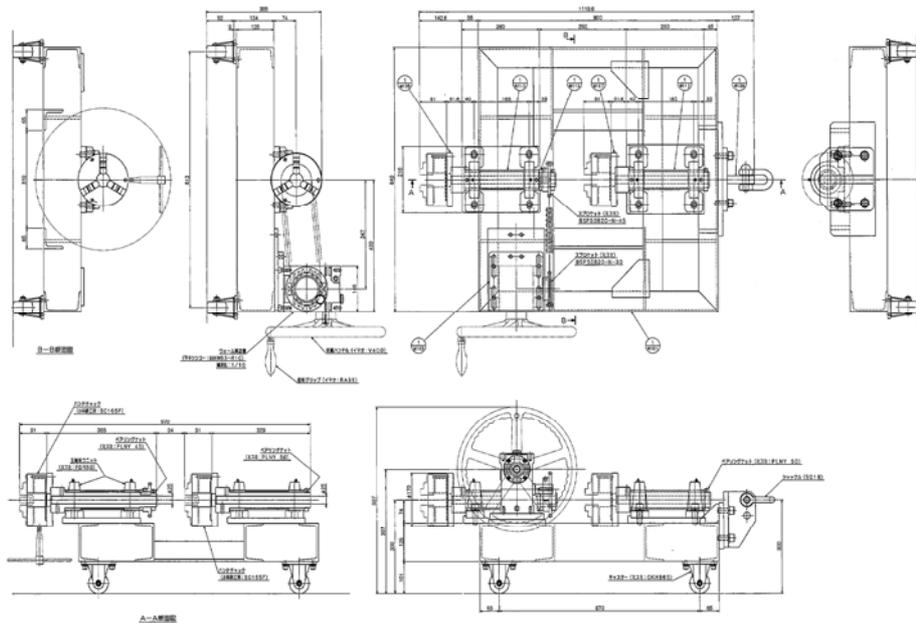


図 2-63 プレフォーム加工性評価治具

φ7mm 高強度鋼線のプレフォーム加工性評価状況を図 2-64 に示す。高強度鋼線を螺旋状に安定的に加工することができ、螺旋状に加工後の状態も良好であることが確認できた。



図 2-64 プレフォーム加工性評価状況

プレフォーム加工後の高強度鋼線をインターロック管に巻き付けた際の状況を図 2-65 に示す。巻き付け性についても良好で、今回試作を行った高強度鋼線は FRP に適用可能であることが分かった。



図 2-65 巻き付け性評価状況

2.4.6.4. 浮力材

2.4.6.4.1. 樹脂テープ試作

(1) 候補材料の調査

FRP の水中重量を低減するためには、FRP の外周部に樹脂テープを巻き付けて浮力層を形成することも有効な手段と考えられる。浮力材の材料に求められる特性の 1 つに、外水圧によって圧縮変形が生じないことが挙げられる。まず、表 2-24 に代表的なエンジニアリングプラスチックの比重と圧縮強さの一覧を示す。

表 2-24 エンジニアプラスチックの比重と圧縮強さ[18]

樹脂名	ナイロン 66	ポリカーボネート	ポリアセタール	エポキシ樹脂	フッ素樹脂
比重	1.09~1.14	1.2	1.41~1.42	1.1~1.2	2.1~2.2
圧縮強さ(kgf/cm ²)	910	780	1000~1300	1000~2000	150

樹脂名	ABS	フッ化ビニリデン	フェノール樹脂	ポリスルホン	塩化ビニル
比重	1.04~1.07	1.77	1.25~1.5	1.24	1.45~1.65
圧縮強さ(kgf/cm ²)	180~570	900~1000	1500~2800	970	750~850

樹脂名	PPO	ポリプロピレン	ポリエチレン	シリコン樹脂
比重	1.06	0.90~0.91	0.94~0.96	1.8
圧縮強さ(kgf/cm ²)	910	385~560	225	600~1000

プラスチックは無機材料に比較して柔軟なものが多く、圧縮強さを含めた機械特性は高く

ないが、適切な無機材料を強化材として添加することで、加工性などのプラスチックの特徴を生かしながら機械特性を向上させることができる。葭原ら[19]によればプラスチックへの強化材の分類やそれぞれの特徴は以下とされる。

- 強化材はその形状で、粒状、繊維状、板状に分類される。
- 繊維状強化材は、もっとも一般的な強化材であり、細くて長い繊維状の強化材を指す。樹脂を織物などに含浸させる方法や、樹脂に練り込む場合がある。アスペクト比の長いものが好ましい。
- 粒状強化材は、強化性は低いものの複合則に物性改善が可能で、分散しやすく高充填化が可能である。さらに、硬度の改善や厚さ方向の物性改善に適している。
- 板状強化材は、厚さに対して長さや幅が大きい板状結晶からなる。成型時の流動方向に対して横方向に強化性を示し、機械的性質や熱的性質が等方的であることから面板などの成形品に適するとされる。

最も一般的とされる繊維状の強化材料の候補としては、ガラス繊維、カーボン繊維、アラミド繊維、ボロン繊維、炭化ケイ素繊維などがある。このうち、ガラス繊維やカーボン繊維などが航空宇宙用途、スポーツ用途、産業用途で利用されている。特に、炭素繊維協会殿によればカーボン繊維はガラス繊維と比較しても、図 2-66 に示すように疲労強度や比弾性率が高いとされる。

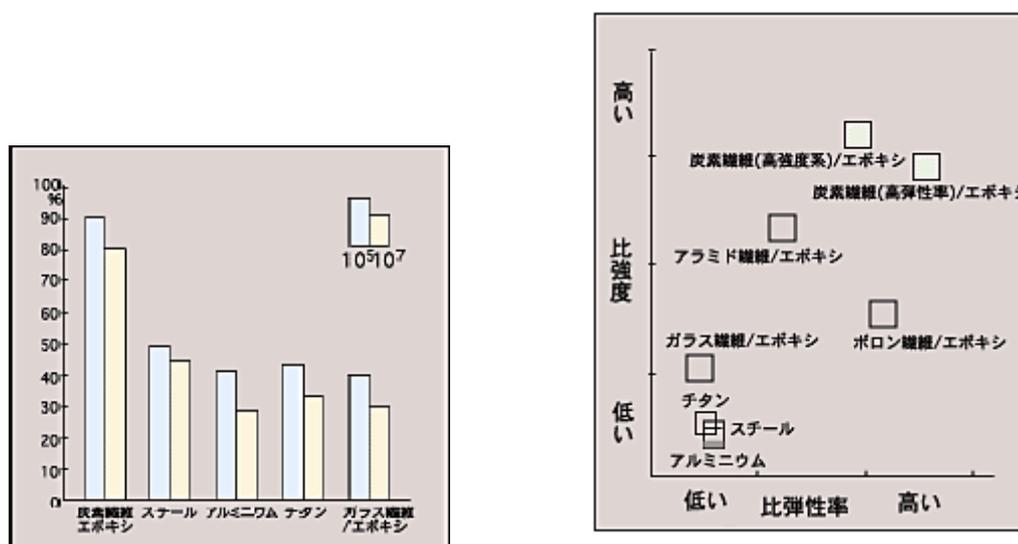


図 2-66 疲労強度の保持率、比強度・比弾性率[20]

また、圧縮特性に加え、浮力材として機能するためには、少なくとも材料比重が海水比重よりも小さい特性が必要で、比重が小さいほど浮力材としての機能が低いといえる。比重を

小さく保ったまま圧縮強度を高めるには、マイクロバルーンと呼ばれるガラス中空ビーズを樹脂中に練り込むことも有効と言われており、どの様な材料が適しているかは、実験等で確認する必要がある。

(2) 浮力材の適用可能性検討

浮力材を適用して FRP を軽量化した場合を想定し、水中重量を変動パラメータとして、動的張力について検討した。解析条件を下記に示す。

- ・水深：500m
- ・FRP 全長：1250m
- ・近接位置：938m、遠方位置 973m
- ・潮流：1.5knot（100m 以降は 1/7 乗速で減少）
- ・動揺条件：周期 TS=8sec、

前後揺れ $\Delta x=0.62\text{m}$ 、左右揺れ $\Delta y=2.11\text{m}$ 、上下揺れ $\Delta z=5.26\text{m}$

図 2-67 に解析結果を示す。浮力材を適用しない現状の水中重量 24.3kg/m で動解析を実施すると、近接位置での動的張力が極端に大きく、遠方位置での動的張力に迫るほどの値である。これは動揺があまりにも大きく FRP が水中でたるんでいることで発生する現象と考えられる（スラックした後のスナップ荷重）。FRP の水中重量を増加した場合、近接位置での動的張力は抑制されることになる。しかし、FRP を軽くした場合には、近接位置での動的張力はさらに増加し、結果として最大張力が増大してしまう危険性があることが分かった。そのため、現状よりも FRP を軽量化することは、現在の動揺条件下において適した対策ではないといえる。ただし、動揺条件次第では、軽量化による最大張力の低減効果が働く場合もあり、浮力材の適用については動揺条件が緩和した場合に改めて検討することにした。

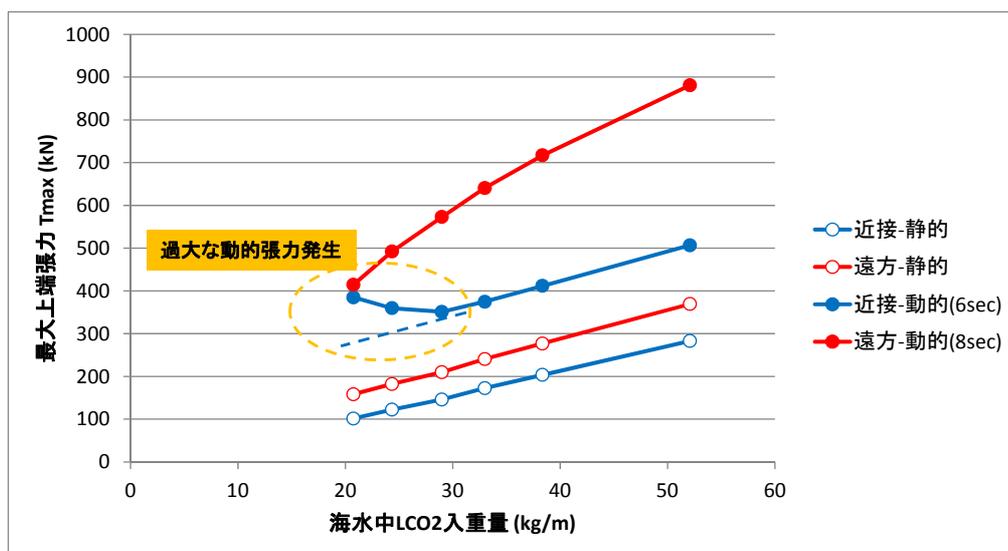


図 2-67 水中重量による動的影響の変化

2.4.6.5. 端末構造

FRP 端部には端末金具が取り付けられ、端末金具のフランジを介して逆止弁、カップラ等と接続される。端末金具には内圧補強層や軸力補強層の引き留め構造、内部流体と外部海水のシール構造など、様々な機能を有する構造体を含んでいるため、FRP に対してサイズ・重量が大きくなってしまうことが課題である。さらに、FRP 上端部には Bend Stiffener (BS)が取り付けられ、FRP 上端部は大きな質点を持つことになる。端末と BS の概算構造を図 2-68 に示す。

ピックアップ方式を実現するためには、FRP 本体の軽量化に加え、端末の軽量化が重要な要素となる。そこで、端末内で大きなスペース、重量を占める軸力補強条の引き留め構造の軽量化を目指し検討を行った。

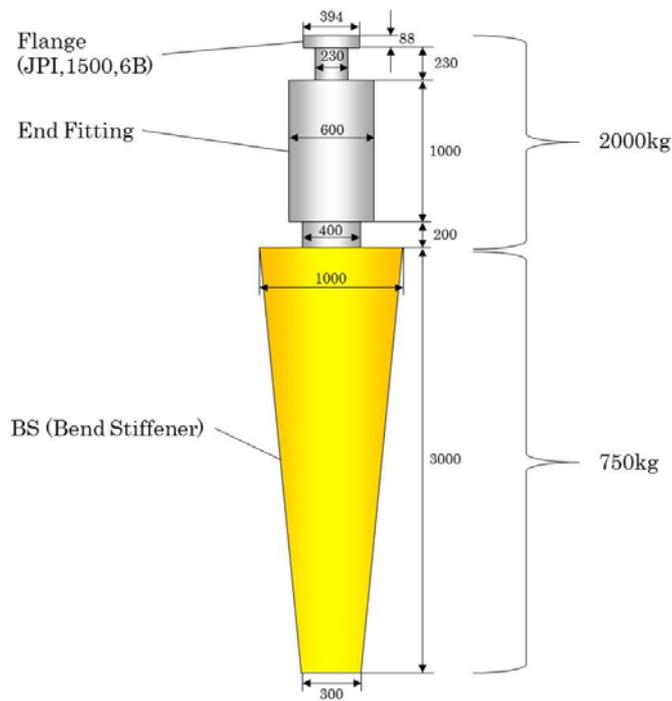


図 2-68 FRP 端末の概算構造

端末モデルについては、サイズを 6inch から 4inch に縮小し、軸力補強層の引き留め構造のみを持たせた。従来引き留め構造を適用した端末モデルの構造を図 2-69 に示す。軽量化した引き留め構造についても検討し、従来構造、軽量化構造、2 種類の端末モデルを製作した。2 種類の端末モデルの構造比較を図 2-70 に示す。軽量化構造では従来構造と比較し、約 40%の軽量化が可能となった。

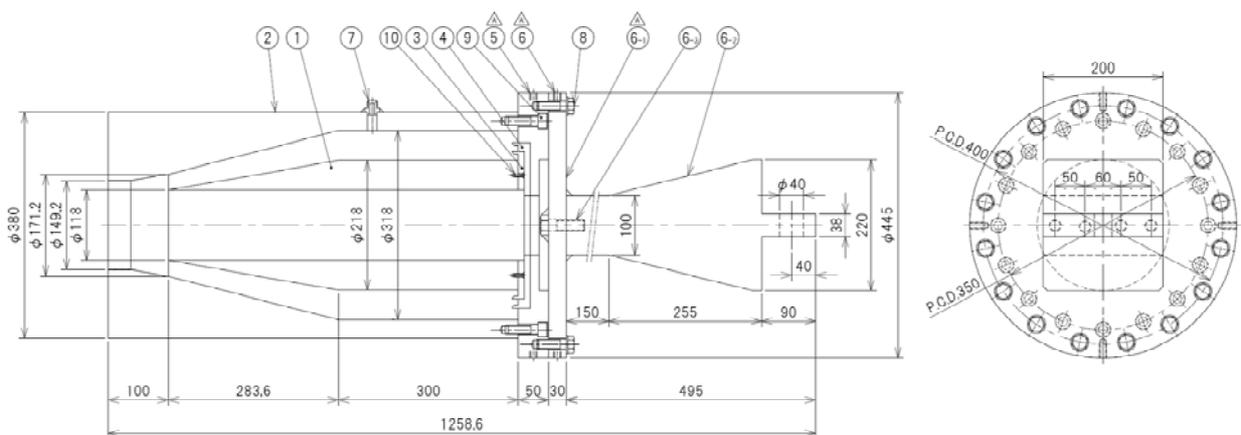


図 2-69 従来構造端末モデル

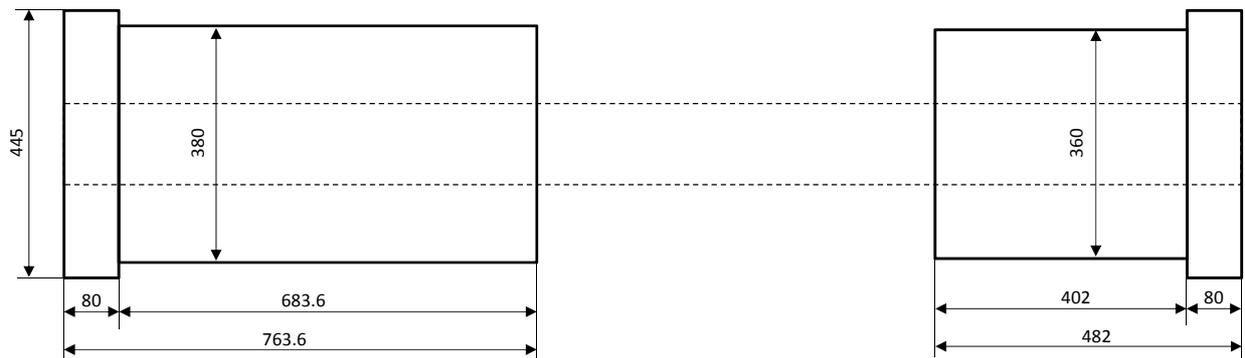


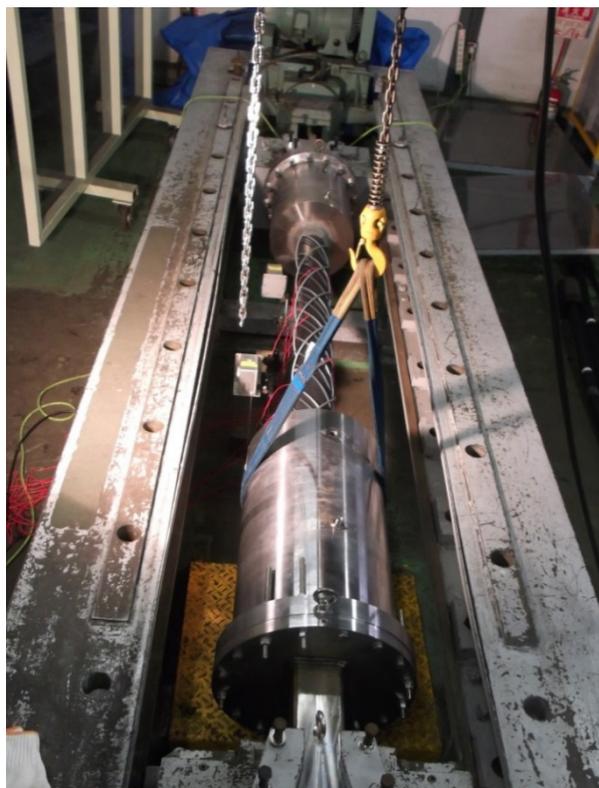
図 2-70 端末モデル比較（左：従来構造、右：軽量化構造）

端末モデルの評価試験を行うため、インターロック管の上に熱収縮チューブを被覆し、高強度鋼線と PET 線を巻き付けた FRP モデルを製作した。FRP モデルの軸方向強度は高強度鋼線の本数に依存することになり、今回は試験装置の仕様に合わせて、内層 3 本、外層 3 本の合計 6 本の高強度鋼線を使用した。組み立て後の端末モデルを図 2-71 に示す。



図 2-71 組み立て後の端末モデル（左：従来構造、右：軽量化構造）

端末モデルを引張試験機に設置し、最大荷重における破壊状態を評価した。試験状況を図 2-72 に示す。引き留め構造の判定基準として引き留め部が張力破壊時の弱点とはならないことが挙げられるが、今回の試験では FRP モデルの中央部で破壊しており、引き留め構造は十分な特性を持つことが分かった。



引張試験機取り付け後



試験前



試験後

図 2-72 端末モデルの引張試験状況

今回の評価により軸力補強層の引き留めに軽量化構造を適用できる可能性が高まった。軽量化構造を適用した場合の改良端末構造を図 2-73 に示す。端末内の各構造体との配置を検討したことで長さは若干増加してしまったが、重量は約 25%低減することが出来た。軽量引き留め構造を実際に適用するためには、引張試験以外にも、繰り返し引張試験など各種耐久性を評価する必要があり、長期的な特性の確認が今後の課題である。

また、軸力補強層の引き留め構造以外にも、内圧補強層の引き留め構造、内部シース、外部シースのシール構造など、それぞれの構造体を検討する必要があり、図 2-73 は暫定的な端末構造となる。

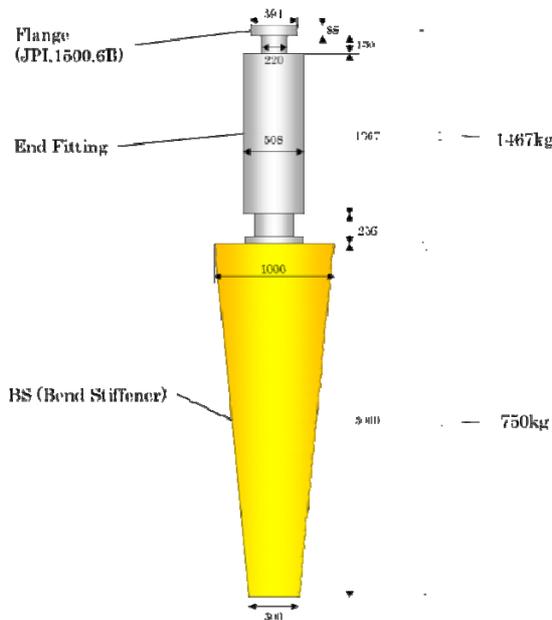


図 2-73 FRP 端末の改良構造

2.4.7. フレキシブルライザーパイプ(FRP)のピックアップ解析

FRP を海底からピックアップする際には、船体が最適位置より近接方向に進み過ぎると FRP に過度な曲げを与えてしまい、遠方方向に進み過ぎると張力が増大してしまう危険性がある。そのため、ピックアップ方式では FRP を安全な状態で船上まで引き上げる制御方法の開発が必要と考えられる。FRP 制御方法を検討するための基礎データ取得を目的にピックアップ時の挙動解析を実施した。

(1) 事前解析

まず初めに、ピックアップ時の状態を大まかに把握するため、ピックアップ時のワイヤー巻き上げ量と浮体移動量の関係を下記の様に定義し事前解析を行った。

- ①ワイヤー上端角度が 20° となる位置を初期浮体位置として設定。
- ②ワイヤーは一定速度 30m/min で巻き上げ開始。(750m の巻き取りに 25 分間)
- ③ワイヤー巻き上げ開始と同時に浮体は中立位置 (X=938m) に向けて移動を開始。
25 分後に中立位置 (X=938m) に到達する様に一定の速度を設定。

海象条件については下記に示し、FRP とピックアップワイヤーの構造は表 2-25 に示す。

図 2-74 に示すピックアップ解析モデルの様に、FRP とピックアップワイヤーに加え、コ

ーン金具、嵌合装置、BS についてもモデル化し、寸法と重量を入力した（BS については曲げ剛性も入力）。潮流方向については、図 2-74 の様に 0deg、180deg の 2 方向で解析を実施し、潮流方向による影響も評価した。

水深：500m

潮流：0.77m/sec（1.5knot）

表層 100m まで一定、それ以上の深度からは 1/7 乗則で減少

表 2-25 FRP とピックアップワイヤーの構造

	FRP	ピックアップワイヤー
全長 (m)	1250	750
内径 (mm)	150	—
外径 (mm)	261.8	45
海水中重量 (kg/m)	24.3	7.75

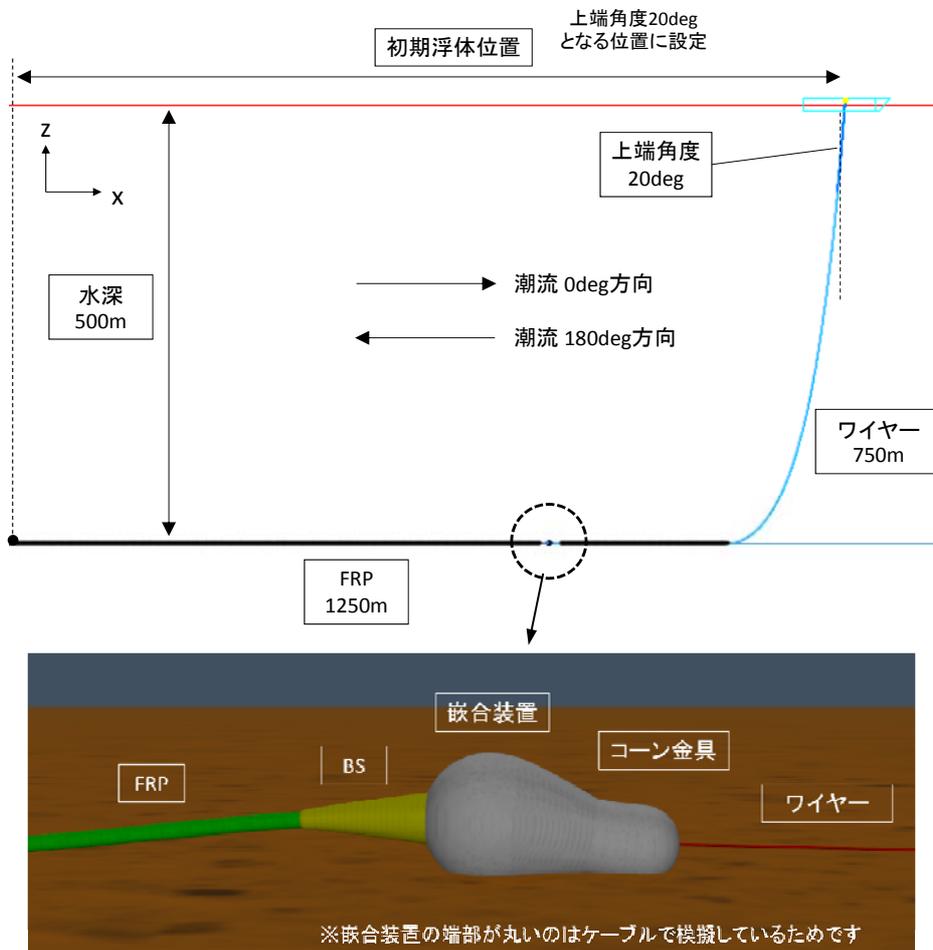


図 2-74 ピックアップ解析モデル

潮流 0deg の解析結果について、表 2-26、図 2-75 に示す。RP の最小曲率半径は FRP が海底面を離れる際（巻き上げ 150m）に発生し、発生位置は BS 下部であった。曲率半径の値自体は、許容曲率半径よりも大きく、問題となる値ではない。本解析に用いたピックアップ条件ではワイヤー上端角度が 20deg 以上となるケースも存在していた。

表 2-26 事前解析結果 (潮流 0deg)

ワイヤー巻き上げ長(m)	0	150	310	430	550	650	750
浮体位置 (m)	1750	1588	1414	1284	1155	1046	938
ワイヤー上端角度 (deg)	19.7	26.5	22.2	17.7	13.0	9.1	6.5
ワイヤー上端張力 (kN)	62.99	124.20	164.72	181.71	196.82	208.82	220.97
FRP 最小曲率半径 (m)	29.17	7.88	16.90	26.28	37.59	37.61	37.65
FRP 最小曲率半径 発生位置	BS 下部	BS 下部	BS 下部	BS 下部	TDP	TDP	TDP

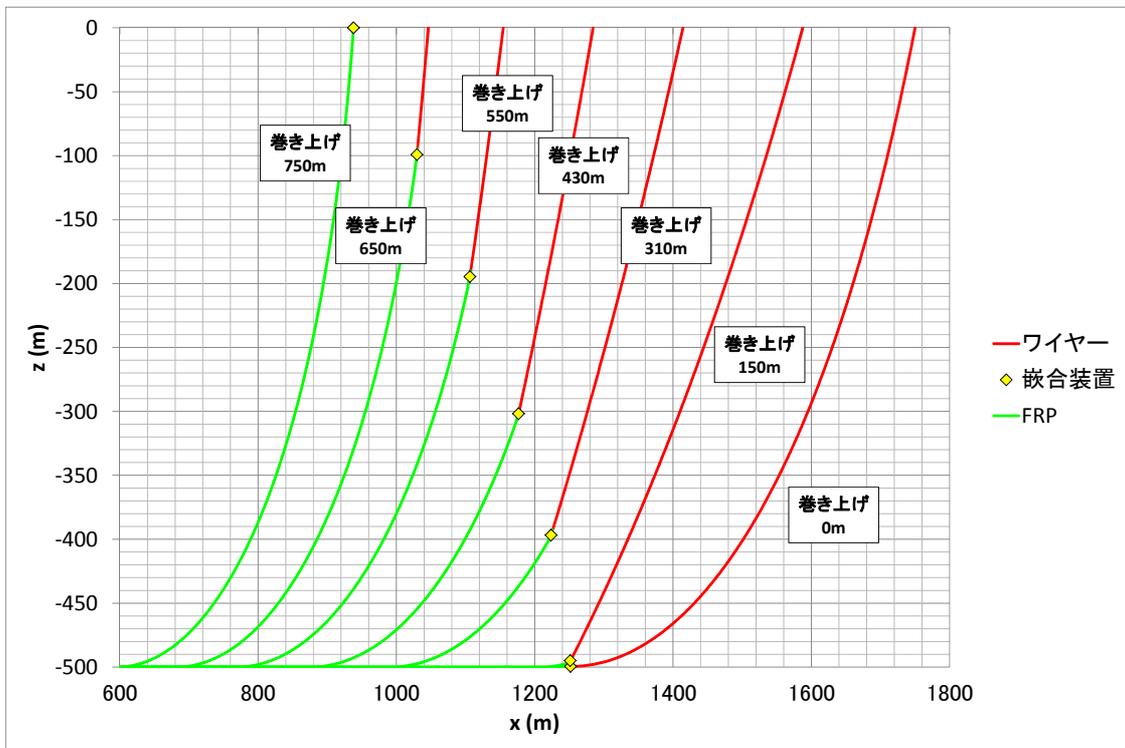


図 2-75 事前解析結果 (潮流 0deg)

潮流 180deg の解析結果について、表 2-27、図 2-76 に示す。潮流 0deg の結果と同様の傾向であるが、潮流 180deg の方が FRP の曲率半径が小さくなりやすいことが分かる。

表 2-27 事前解析結果 (潮流 180deg)

ワイヤー巻き上げ長(m)	0	180	320	440	540	650	750
浮体位置 (m)	1720	1532	1386	1261	1157	1042	938
ワイヤー上端角度 (deg)	19.8	25.2	21.2	17.8	15.9	14.8	16.9
ワイヤー上端張力 (kN)	51.01	111.69	145.21	157.14	165.98	176.87	188.87
FRP 最小曲率半径 (m)	23.64	6.49	15.72	25.68	36.28	37.57	37.57
FRP 最小曲率半径 発生位置	BS 下部	BS 下部	BS 下部	BS 下部	BS 下部	TDP	TDP

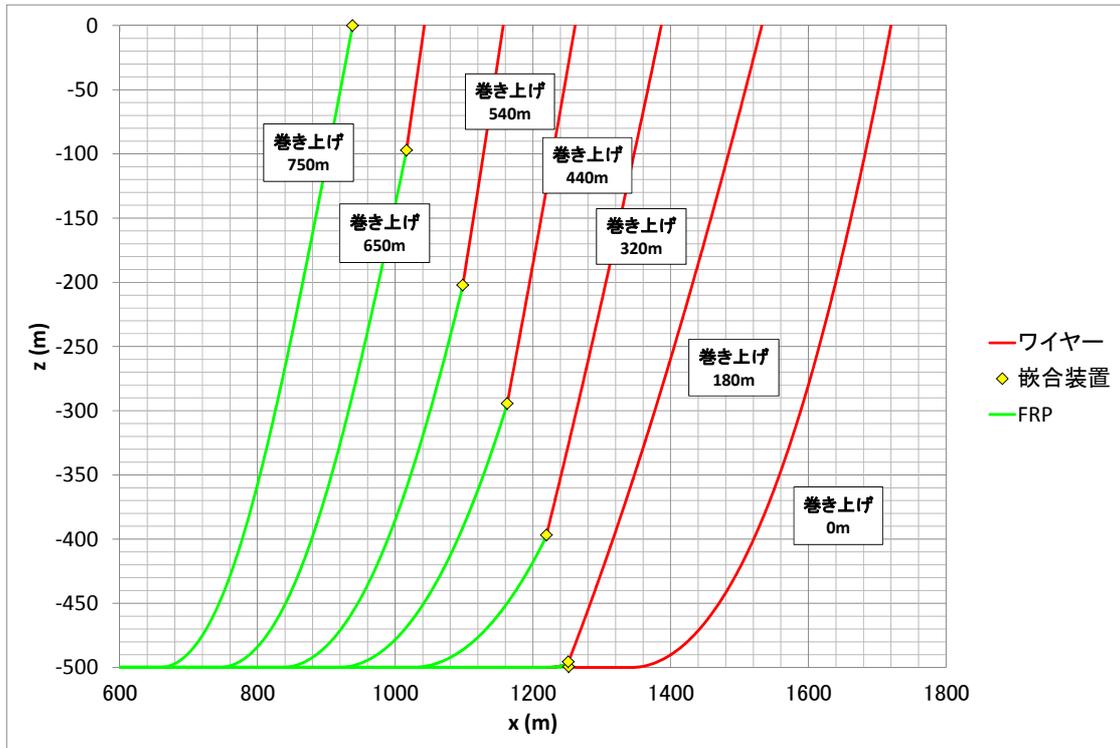


図 2-76 事前解析結果 (潮流 180deg)

(2) 動的影響検討

ピックアップ解析では、通常の FRP 挙動解析に加え、ワイヤー巻き上げ長も変動パラメータとして追加されるため、解析ケースが膨大となる。全ての解析ケースにおいて動解析までの検討を実施するためには多くの検討時間を要するため、まずは動的影響の度合いを把握するため、解析条件として FRP が海底面を離れる境界付近に位置する 1 ケースを選択し動

解析を実施した。選択した解析条件を下記に示す。

- 潮流：1.5knot（100m 以降は 1/7 乗速で減少）
- 潮流方向：180deg
- ワイヤー巻き上げ長：180m
- 浮体位置：1519m
- 動揺条件：周期 TS=6sec、前後揺れ $\Delta x=0.21\text{m}$ 、左右揺れ $\Delta y=0.84\text{m}$ 、上下揺れ $\Delta z=2.22\text{m}$

解析結果を表 2-28 に示す。ワイヤー上端角度の動的影響は 2deg 程度と小さく動的影響は小さい。ワイヤー上端張力が大きく変動しているのは嵌合装置が浮いたり着底したりを繰り返している影響で、FRP に加わる変動張力が大きい訳ではない。FRP 最小曲率半径については、静解析と比べ動解析では小さな値を示しており、十分な注意が必要である。

表 2-28 動解析結果（潮流 180deg、ワイヤー巻き上げ長 180m、浮体位置 1519m）

解析条件	ワイヤー巻き上げ長(m)		180
	浮体位置 (m)		1519
静解析結果	ワイヤー上端角度 (deg)		20.0
	ワイヤー上端張力 (kN)		59.93
	FRP 最小曲率半径 (m)		16.63
動解析結果	ワイヤー上端角度 (deg)	最大	22.0
		最小	20.0
	ワイヤー上端張力 (kN)	最大	152.95
		最小	28.48
	FRP 最小曲率半径 (m)		6.09

(3) FRP 制御範囲検討

FRP 制御方法検討の基礎データとするため、ピックアップ解析結果の整理を行った。ピックアップ時、FRP にとって避けなくてはならないのは、許容張力、許容曲率を超えてしまう状態である。これまでに実施したピックアップ解析では、張力が許容値を超えるケースは少なく、FRP の制御範囲を決める大きな要因は曲率半径であることが分かっている。また潮流方向は 180deg の条件で曲率半径が小さくなる傾向にあるため、潮流方向 180deg のデータのみを整理した。FRP の許容曲率半径を元にした危険度の定義案を表 2-29 に示す。

表 2-29 ピックアップ時の危険度の定義案

	FRP 曲率半径	内容
危険度 3	0~4.1mR	どのような海象条件であっても進入禁止
危険度 2	4.1~8.2mR	穏やかな海象条件であれば進入してもよい
危険度 1	8.2mR~	

浮体位置 X、ワイヤー巻き上げ長 L によるワイヤー上端角度 θ の変化に合わせて、危険度の範囲を示したグラフを図 2-77 に示す。FRP の曲率半径が小さくなるのは、FRP が海底面を離れた直後のみで、ワイヤー上端角度 θ が小さい程、危険度が増すことが分かる。

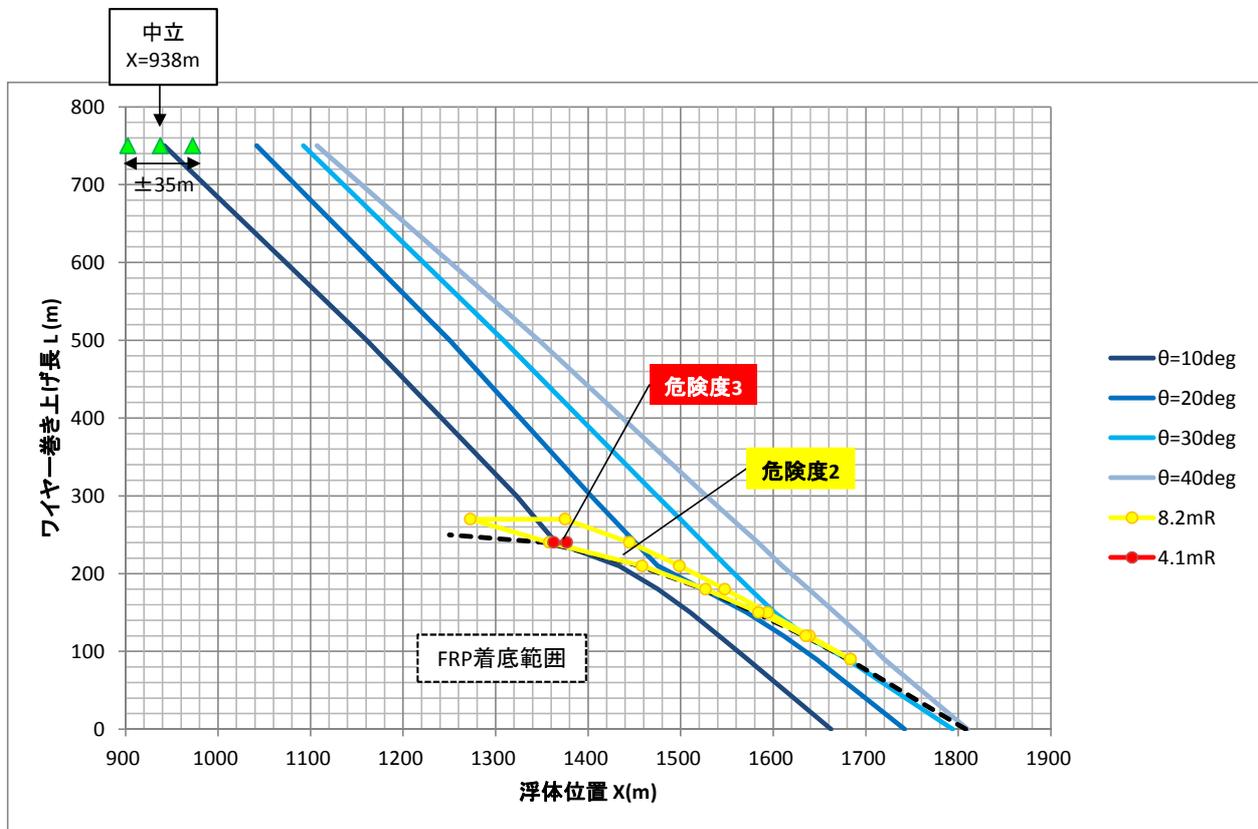


図 2-77 ピックアップ時の危険度マップ (潮流 180deg)

図 2-77 の危険度マップから、ピックアップ時のオペレーション方法について検討を行った。下記に 3 つの案を検討し、そのピックアップルートを図 2-78 に示す。

- ① $\theta = 20\text{deg}$ 固定

FRP が海底面を離れるタイミング（ワイヤー巻き上げ長 $L=150\text{m}\sim 200\text{m}$ の範囲）で危険度 2 の領域を通過することになるが、海象条件が厳しくなければ問題はない。ピックアップにはワイヤー上端角度を取り入れた制御システムに加え、海象条件の判定基準も必要となる。

② $\theta=40\text{deg}$ 固定

すべての領域で危険度 2 に入ることなく安全なピックアップが可能。ワイヤー巻き上げ長 L が大きくなる（嵌合装置と FRP 上端が船に近づく）に従って、ワイヤー上端張力が大きくなってしまふことが問題。

③ $\theta=40\text{deg}$ 固定で $L=300\text{m}$ までピックアップし、 $\theta=10\text{deg}$ に移行

候補②の改良案。FRP が海底面を離れる領域以外では危険度の高い領域は存在しないため、FRP 地切り後はワイヤー上端角度 θ を小さくして張力を低減する。

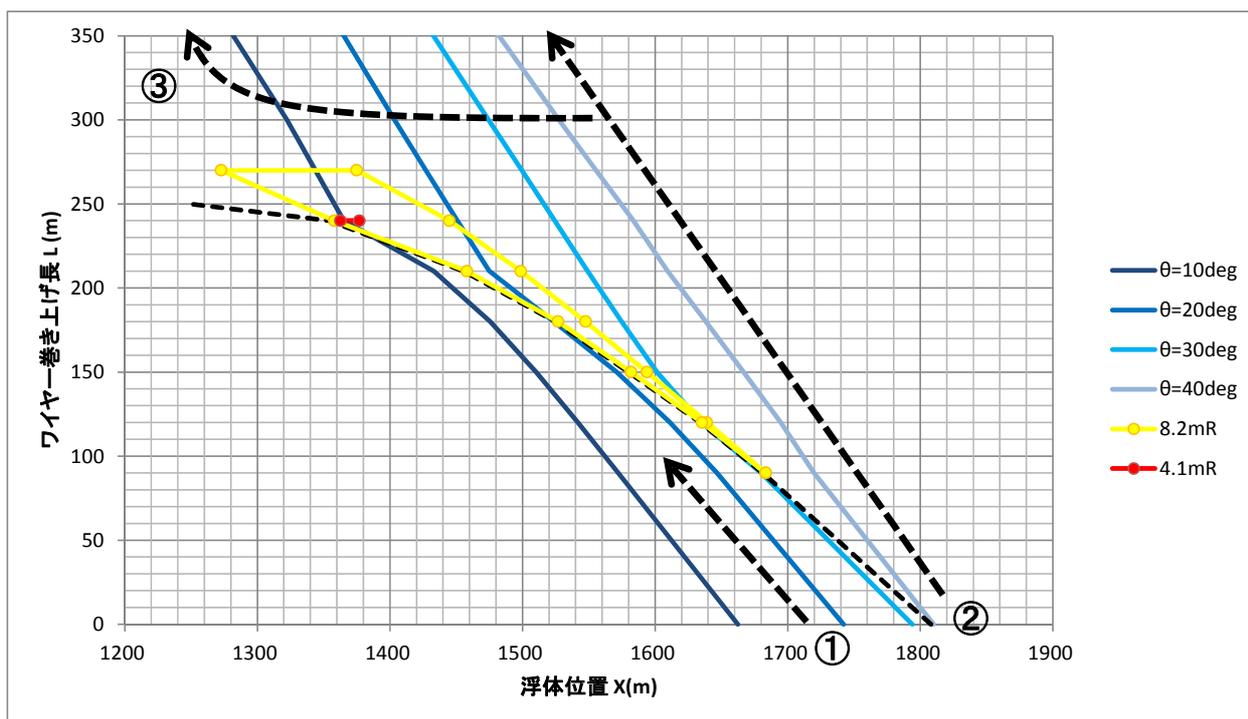


図 2-78 ピックアップ時のオペレーション方法案

2.4.8. フレキシブルライザーパイプ(FRP)上端の遮断弁

FRP 上端にはボール弁を取り付けることを想定している。操作手順としては、FRP 嵌合

時にボール弁を固定後、シリンダを伸ばしてクラッチにてボール弁と接続して開閉することを想定している。(資料編 2-30)

2.5. シャトルシップの基本設計

輸送前の CO₂ の一時貯蔵のオペレーション、二酸化炭素の適切な輸送・貯留条件(温度・圧力)、CO₂ 圧入オペレーションに求められる船体制御条件等、シャトルシップ船体および主要な船上設備に係る設計条件を検討し、効率的な範囲に設定する。

2.5.1. 船体

2.2 で検討した海象条件下において、2.4 で検討したピックアップ・嵌合装置を搭載し、オペレーションを安全かつ確実なものにするためのシャトルシップの船体を検討している。

表 2-30 船体の設計の考え方

設計条件	設計の考え方	検討状況
適用法規	船籍や航路に依存 また、将来転売時の考慮の有無	汎用性を高めることから、国際航路仕様で検討着手。新 IGC コード適用予定。
船型要目 (船長、船幅、喫水)	港湾制限、船速、運動特性、船上設備の配置・作業性、載荷重量、一般要件(安定性能、推進性能、重量・重心など)の充足確認	港湾制限情報なし。波浪中の 動揺低減船型 を含めて、継続検討中。
カーゴ容積	運航シミュレーション結果(航路、航続距離、稼働率、隻数などに依存)、CO2の温度、圧力	3,000m ³ で一旦仮決め。
載荷重量	必要カーゴ重量(運航シミュレーション結果次第)、燃料油、バラスタタンク量により決定	継続検討中。
船速	運航シミュレーション結果(航路、航続距離、稼働率、隻数などに依存) 船型主要目、主機馬力に依存	継続検討中。
Sea margin ⁷	同上+輸送海域、稼働率に依存	継続検討中。
航続距離	航路、隻数、稼働率などに依存 運航シミュレーション	継続検討中。
船上設備サイズ	ピックアップ装置、嵌合装置、CO2圧入装置、CO2タンクなど特殊装備品の配置計画を優先して配置検討	CO2タンクは構造強度上4分割(750m ³ x 4ヶ)。圧入装置の概略寸法を入手して継続検討中。
運動特性の制約	海域と作業性、安全性、稼働率から算出	作業性を考慮して、船首部にブリッジを配置する新配置案も Option として検討中。

⁷ Sea margin:新造で船底清浄後に平水中で必要な出力に対し、実海域の海象条件や生物付着等による出力低下を想定した出力余裕の度合い